

DETREKŐI ÁKOS

A gömbtől a geoidig: a Föld és az űrkutatás



*Detrekői Ákos
mérnök
az MTA rendes tagja*

Az embereket évezredek óta érdekli lakóhelyük, a Föld. Már az ókorban is tettek fel ilyen kérdéseket: Milyen alakja van a Földnek? Mi található a Föld felszínének valamelyik pontján? Az űrtechnika kialakulása előtt feltett kérdésekre a szakemberek (geodéták, térképészek) a Föld felszínén végzett mérések segítségével válaszoltak. Az űrtechnika kialakulása alapvetően megnövelte a Föld alakjával kapcsolatos ismereteinket. Ezek az ismeretek nemcsak tudományos szempontból érdekesek, hanem megjelennek mindennapi életünkben is, gondoljunk például a meteorológiai célú űrfelvételekre vagy a korszerű jármű-navigációs rendszerekre. Az előadás a Föld alakjáról és felszínéről az űrtechnika segítségével nyert legújabb ismereteket mutatja be.

1939-ben született Budapesten. 1963-ban kitüntetéssel diplomázott az Építőipari és Közlekedési Műszaki Egyetemen. 1971-ben a műszaki tudomány kandidátusa, 1978-ban akadémiai doktora lett; 1990-től az MTA levelező, majd 1995-től rendes tagja.

Pályáját a Budapesti Műszaki Egyetem oktatójaként kezdte, 1980-ban nevezték ki egyetemi tanárnak a Műegyetem Foto-grammetria tanszékére. 1986–1990 között az Építőmérnöki Kar dékáni teendőit látta el. 1997 óta a Műegyetem (Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem) rektora.

Számos akadémiai szakkbizottság tagja, főtktára, elnöke.

Több nemzetközi szervezetnek tisztségviselője, három külföldi akadémia tiszteleti tagja. A Magyarországi Humboldt Egyesület tiszteletbeli elnöke. Számos könyv, jegyzet, publikáció szerzője mérnökgeodéziai, foto-grammetriai és távérzékelési, illetve mérési témakörben.

Főbb kutatási területe: a mérési eredmények matematikai feldolgozása és a térinformatika.

Bevezetés: a Földdel kapcsolatos ismeretek

Az emberiséget – s feltehetően szinte minden embert – már évezredek óta érdekli lakóhelyének, a Földnek az alakja.



Mérnök a terepen a 16. században

Az általános jellegű érdeklődés mellett a mindennapi életben gyakran szembesülünk olyan kérdésekkel, mint:

-) Hol vagyunk most (mármint a Föld felszínén)?
-) Hol található a legközelebbi folyó?

A Föld alakjával és méretével, a Föld felszínén található tárgyak helyzetének meghatározásával foglalkozó szakterület a **geodézia** (vagy korábbi nevén alkalmazott geometria).

A Földdel kapcsolatos ismereteket a szakemberek és a felhasználók évszázadokon keresztül a Föld felszínén mozogva, ott méréseket végezve szereztek meg.

A Föld felszínétől való elszakadás lehetőségét a repülőgép feltalálása jelentette. Aki már kinézett a repülőgép ablakán, az tudja, mennyivel többet lehet onnan látni, mint mondjuk egy gépkocsi ablakából.

Az űrtechnika kialakulása további – bátran forradalminak nevezhető – változást hozott a Földdel kapcsolatos ismereteink bővülésében. Előadásomban az űrtechnika segítségével a Föld alakjáról és felszínéről szerezhető legújabb ismeretekről, illetve ismeretszerzési lehetőségekről és ezek felhasználási módjairól szeretnék rövid áttekintést nyújtani.

A Föld elméleti és fizikai alakjai

A Föld alakjáról szólva hagyományosan különbséget teszünk a Föld **fizikai alakja** és a fizikai alak közelítésére szolgáló **elméleti alakok** között.

A Föld fizikai alakján a litoszféra (azaz a szárazföld) és hidroszféra (azaz a vizek) által meghatározott Földalakot értjük. A fizikai Földalak csak pontokként, vonalakként vagy felületekként – s nem valamilyen zárt matematikai formában – adható meg. A fizikai Földalakkal kapcsolatos ismeretek közlésének hagyományos formája a **térkép**. Az informatika fejlődése következtében ezek az ismeretek napjainkban sajátos információs rendszereknek, az úgynevezett **térinformációs** (vagy más szóval **geoinformációs**) rendszereknek az alkotóelemei.

Az elméleti Földalakok a Föld egészét vagy bizonyos részeit matematikai függvényekkel leíró modellek, amelyek megfelelően tükrözik a Föld geometriai, fizikai jellemzőit. Az elméleti Földalakokat szokás a Földdel összefüggésben felhasznált vonatkozási (koordináta-) rendszerek alapfelületeinek nevezni.

Az elméleti Földalakokkal kapcsolatos elképzelések fejlődése

A gömb

A legkorábbi „elméleti” Földalak az ókori Görögországból származik. Homérosz *Iliászában* (Kr. e. kb. 800) a Föld egy lapos korong, amelyet óceánok vesznek körül.

Geodézia:

a helymeghatározás tudománya; a Föld méretét, alakját, külső nehézségi erőterét, valamint a Földfelület természetes és mesterséges részleteinek helyét határozza meg és ábrázolja.

Fizikai Földalak:

a Földnek a litoszféra és a hidroszféra által meghatározott alakja.

Elméleti Földalak:

a Föld egészét vagy bizonyos részeit matematikai függvényekkel leíró modell, amely megfelelően tükrözi a Föld geometriai, fizikai jellemzőit.

Geoinformációs rendszer:

a helyhez kapcsolódó (térbeli) információkkal kapcsolatos funkciók ellátására szolgáló információs rendszer.



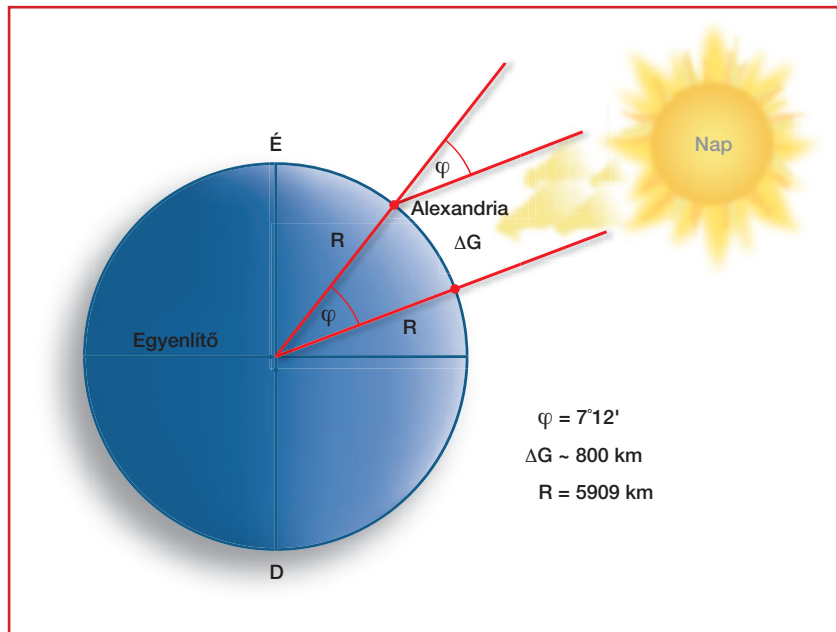
Ortofoto Budapest területéről

Pár évszázaddal később Püthagorasz (Kr. e. kb. 580–500) – elsősorban esztétikai megfontolásból – már gömb alakúnak tekintette a Földet. Ez az elképzelés Arisztotelész korában (Kr. e. 384–322) általánosan elfogadottá vált, s megfigyelésekkel támasztották alá.

Ha a Földet gömb alakúnak tekintjük, méretének meghatározásához elegendő egyetlen mennyiségnek, a gömb sugarának az ismerete. A Föld-gömb sugarát elsőként Eratoszthenész (Kr. e. kb. 276–195) határozta meg. Eratoszthenész a sugár hosszát egy körcikkből számította ki.

A körcikk szögét annak felismerésével mérte meg, hogy a nyári napforduló idején délben Asszuánban – amely város a Ráktérítőn helyezkedik el – merőlegesen sütnek a Nap sugarai. Ugyanakkor Alexandriában a merőlegestől – egy sajátos műszerrel, a gnomonnal mérve – 7 fok 12 perccel térnek el. A körcikk ívének hosszát a karavánok menetideje alapján becsülte meg. Az Eratoszthenész által számított Földsugár értéke 5909 kilométernek felelt meg. Ez az érték meglepően pontos, mintegy 7 százalékkal tér el a jelenlegi ismereteink szerinti mintegy 6300 kilométeres sugárhossztól.

A gömb alakú Föld sugarának
mérési elve



A görögöket követően Kínában Nanküing Yüah és I-Hsing (725 körül), illetve az arab kalifátusban Al-Mamum (813–833) is megmérték a gömbnek tekintett Föld sugarát.

A középkorban a Föld alakjával kapcsolatos tudományos elképzelések háttérbe szorultak. A gömbnek mint elméleti Földalaknak a vizsgálata a 15–16. században folytatódott Európában. Ezeket a vizsgálatokat részben a földrajzi felfedezések, részben a tudomány általános fejlődése inspirálták.

A forgási ellipszoid

A 16. és a 17. század nagy csillagászainak felfedezései, továbbá Newton (1643–1727) általános tömegvonzás-törvénye arra a felismerésre vezettek, hogy az elméleti Földalak nem lehet gömb. Kimutatták ugyanis, hogy a forgásban lévő egyenletes eloszlású test egyensúlyi alakja szükségszerűen eltér a gömbtől. Ezt a felismerést támasztották alá az egyre pontosabb eljárásokkal végzett mérések feldolgozásakor jelentkező ellentmondások is. Az elméleti vizsgálatok alapján a forgó Föld egyensúlyi alakjának a **forgási ellipszoidot** tekintették. Forgási ellipszoidhoz úgy juthatunk, ha egy ellipszist kistengelye vagy nagytengelye körül körbeforgatunk.

Amíg a gömb méretének meghatározásához elegendő egyetlen mennyiség, a sugár, addig a forgási ellipszoid alakjának és méretének meghatározásához két mennyiség – például a fél nagytengely hossza és a fél kistengely hossza – szükséges. Tekintettel arra, hogy a forgási ellipszoid meghatározásához két mennyiséget kell ismernünk, ezek értékének meghatározásához legalább két egymástól különböző ív hosszát kell megmérni. A forgási ellipszoid alakjának és méretének meghatározására végzett méréseket **fokméréseknek** nevezik.

Forgási ellipszoid:

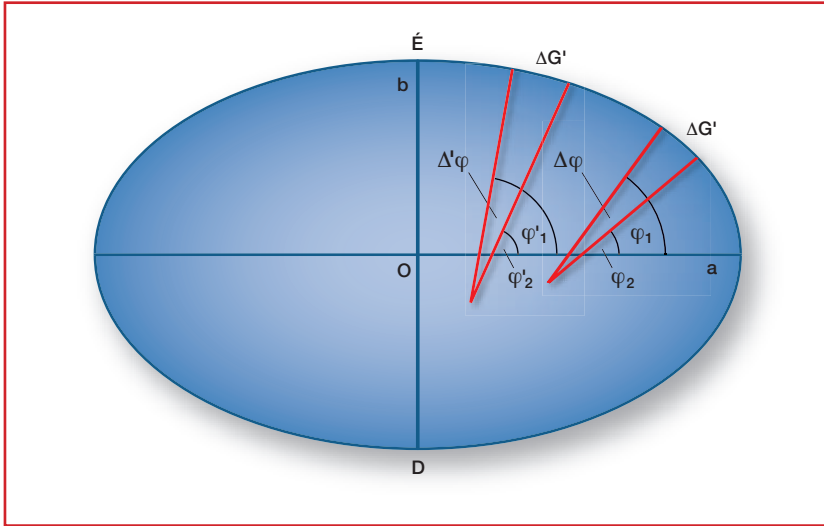
elméleti Földalak, a vízszintes koordináták egyik alapfelülete, amelyet elsősorban globális térinformációs rendszerek esetén használnak.

Fokmérés:

a forgási ellipszoid alakjának és méretének meghatározására végzett mérés.

Az elméleti vizsgálatok alapján az elméleti Föld-modellnek egy kistengelye körül forgatott – tehát a sarkoknál belapított, narancsra emlékeztető alakú – forgási ellipszoidnak kellett lennie.

A Franciaországban 1683–1718 között végzett első fokmérés eredményei nem támasztották alá az elméletet. Mint később kiderült, mérési hibák következtében a sarkoknál „megnyújtott” citrom alakú forgási ellipszoidhoz jutottak. A megindult „narancs–citrom” vita végére egy második fokmérés tett pontot, melyet a Francia Tudományos Akadémia végeztetett el 1736 és 1737 között, s amely a narancshoz hasonlító ellipszoidot eredményezett.



A forgási ellipszoid meghatározásának elve

Érdekességként megemlítem, hogy a következő, 1792–1808 közötti fokmérésnek az eredményeként jutottunk a *méter* első tudományos igényű definíciójához, amely szerint a méter az Északi-sarktól Párizson át az Egyenlítőig futó délkörív negyedének tízmilliomod része.

A forgási ellipszoidot mint elméleti Földalakot a gyakorlati életben mind a mai napig használjuk a térképek úgynevezett *síkráj*ának az alapfelületeiként. Az egyes országok térképezéséhez a különböző időkben különböző alakú és méretű forgási ellipszoidokat használják. Az ellipszoidok helyzetét (szakmai kifejezéssel: elhelyezését) úgy választják meg, hogy az legjobban simuljon az adott országhoz. Tájékoztató értéknek megemlítem, hogy jelenlegi ismereteink szerint a forgási ellipszoidok nagytengelyének hossza mintegy 6378 kilométer, a kistengely ennél 21 kilométerrel rövidebb.

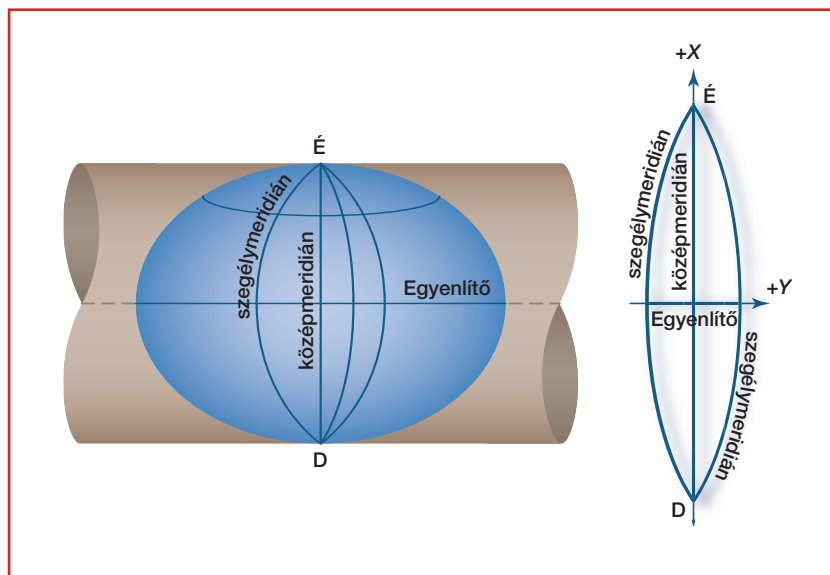
Néhány, ma Magyarországon használt forgási ellipszoid elnevezését, fél nagytengelyét, úgynevezett lapultságát és alkalmazási területét a következőkben foglalom össze:

Név	Fél nagytengely (m)	Lapultság	Alkalmazási terület
Bessel	6 377 397,15	1/302,78	régi kataszteri térképek
Kraszovszkij	6 378 245	1/298,3	1999 előtti topográfiai térképek
IUGG	6 378 160	1/298,247	1970 utáni kataszteri térképek
WGS	6 378 137	1/298,257	GPS mérések

A táblázatban szereplő lapultság a két tengely hosszkülönbségének a nagy-tengelyhez viszonyított aránya.

A most bemutatott forgási ellipszoidok jellemzőit már nem csak egyetlen fokmérés eredményeit felhasználva számították ki. A számításhoz a Föld egészen – vagy legalább egy kontinensen – végzett különböző méréseket használtak fel.

A Gauss–Krüger-vetület



Érdekes kérdés az, hogy hogyan jutunk el a két irányban is görbült forgási ellipszoidtól a síkba teríthető térképig. Ennek a témának – az úgynevezett *vetítésnek* – a tárgyalása azonban meghaladja az előadás témakörét. Ízelítőként csupán a ma legelterjedtebb, úgynevezett *világvetület*, a Gauss–Krüger-**vetület** elvét szemléltetem. Elképzelhető, hogy ha a forgási ellipszoidot egy ellipszis alapú hengerrel vesszük körül, akkor a két test egyetlen ellipszis mentén torzulásmentesen érintkeznek. Az érintkezési ellipszistől kis távolságban is kicsik lesznek a torzulások. A viszonylag kis méretű – a narancsgerezd külsejének megfelelő alakú – felületek a síkba kiteríthetők. Az eljárás a henger elforgatásával megismételhető, s így végső soron az egész ellipszoid kiteríthető a síkba. Az eljárás lényegét könnyen megérthetjük, ha egy narancs héját gerezdenként lehelyezzük egy asztal lapjára.

Vetület:

adott törvényszerűségeket matematikai egyenletek segítségével megvalósító vetítés.

Geoid:

elméleti földalak, a Földre jellemző nehézségi erőtér potenciáljának speciális szintfelülete, amelyet a középtengerszinthez kötnek. A magassági adatok vonatkozási rendszere.

A geoid

A mérési eljárások pontosságának növekedése következtében a 19. század második felében egyre világosabbá vált, hogy a forgási ellipszoid mint elméleti Földalak nem minden célra megfelelő. Ez viszonylag könnyen belátható, hiszen a forgási ellipszoid mint egyensúlyi Földalak bevezetésekor nem számoltak a Föld belsejének tömeg egyenetlenségeivel. Ebből következik, hogy tisztán geometriai alapon nem lehetséges megfelelő elméleti Földalak definiálása.

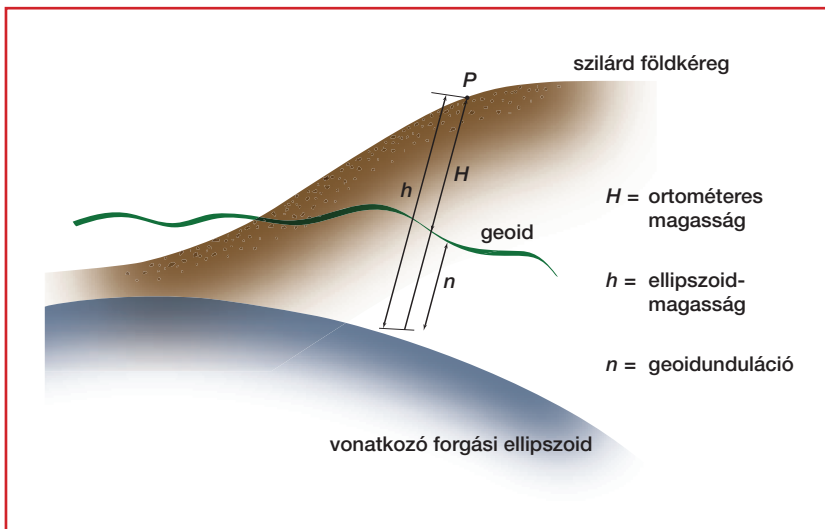
Fizikai elven alapuló Földalakot Listing definiált 1878-ban. Ennek az elméleti Földalaknak a neve **geoid**. A geoid a nehézségi erővel kapcsolatos

alakzat, a nehézségi erő úgynevezett potenciáljának egy kitüntetett szintfelülete. Ezt a szintfelületet úgy képzelhetjük el, hogy az óceánokon a nyugalomban lévő közepes tengerszinthez, a szárazföldeken pedig az említett közepes tengerszint folytatásához simul. Természetesen az árapályhatás, az óceánok áramlatai, a viharok következtében ez a nyugalomban lévő közepes tengerszint sosem létezik a valóságban.

A geoid jellemzéséhez két utat követhetünk. Az egyik út földi mérések alapján a geoid bizonyos pontjainak meghatározása valamely vonatkozási felületnek felvett forgási ellipszoidhoz képest. (Az ellipszoid egyes pontjainak és a geoid megfelelő pontjainak távolságát **geoidundulációnak** nevezik).

Geoidunduláció:

valamely forgási ellipszoid és a geoid megfelelő pontjainak távolsága.



Geoidunduláció

Ez az eljárás a Föld egyes területein csak kisszámú pont meghatározására alkalmas.

A másik út esetén űrtechnikán alapuló mérések segítségével a geoidot valamely forgási ellipszoidhoz képest – a topográfiai térképek magasságábrázolásához hasonlóan – a geoidundulációk szintvonalalaival adjuk meg. Ez az eljárás a Föld egészére kiterjeszthető.

A geoid gyakorlati felhasználását elsősorban az jelenti, hogy a geoid az alapfelülete a magasságok meghatározásának. A köznyelvben is elterjedt tengerszint feletti magasság kifejezés a geoidhoz kapcsolódik. A magasság meghatározásához a tengerparttal rendelkező országok úgynevezett *mareográf*tal – hosszú időn keresztül észleléssel – meghatározzák a közép-tengerszintnek, azaz a geoidnak egyetlen pontját. Ez a pont szolgál alapul az adott országban a magasság meghatározásához. A különböző országokban meghatározott közép-tengerszintek kismértékben eltérhetnek egymástól.

Magyarországon jelenleg két egymástól különböző magassági rendszer létezik. Az egyik, az úgynevezett *adriai magasság* a Habsburg Birodalom egészének magassági rendszere. Ennek alapja a trieszti Molo Sartorio mareográfja. A másik magasság az úgynevezett *balti magasság*. A balti magasság a Varsói Szerződés államainak közös magassági rendszere volt, amelynek kiindulópontja a kronstadti mareográf volt. Miután az első világháború

Nadap:

Magyarország geodéziai szintezési főalappontja a Fejér megyei Nadap községnél.

vége óta Magyarországnak nincs tengere, magassági fő alappontként egy korábban meghatározott, geológiaiilag stabilnak tekinthető pontot, a Nadapot választották.

Ennek a pontnak a magassága a két rendszerben a következő:

-) adriai magasság: 173,8385 méter;
-) balti magasság: 173,1638 méter.

Az elméleti Földalak meghatározása űrtechnikai eszközökkel

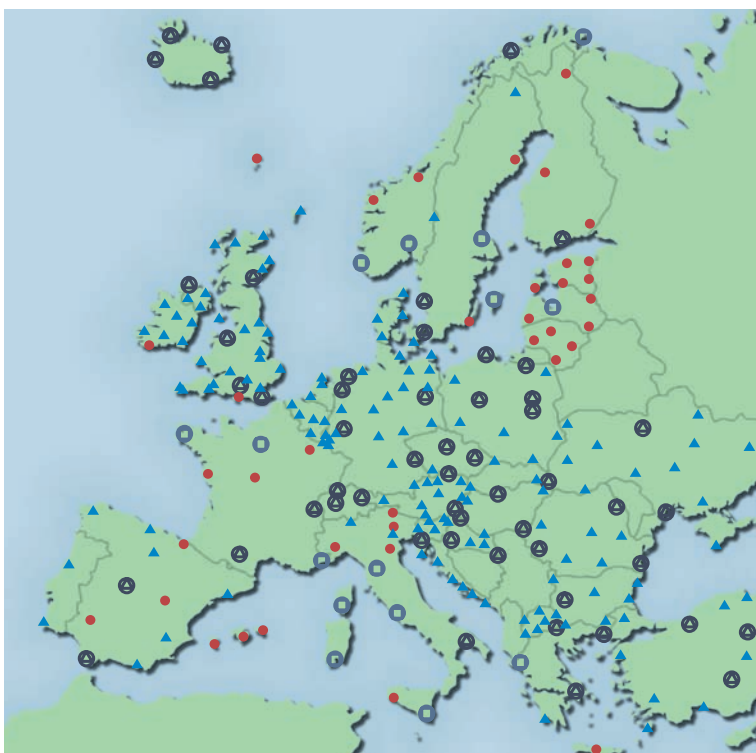
A korábbiakban a geoidot mint a nehézségi erő potenciáljának speciális szintfelületét definiáltuk, amely az óceánokon a közepes tengerszinthez simul. A mesterséges holdak különböző típusainak elterjedése alapvetően megnövelte a geoiddal kapcsolatos ismereteinket.

Az ismeretek bővülésének két egymástól független módja alakult ki:

-) a mesterséges holdak pályaelemeinek mérésével a nehézségi erőter rendellenességeinek a meghatározása és ezek alapján a geoid számítása;
-) a mesterséges holdakon elhelyezett műszerek, az úgynevezett radar-altiméterek felhasználásával a geoid közvetlen mérése.

A mesterséges holdak Kepler ismert törvénye alapján ellipszis alakú pályán keringenek a Föld körül. A Föld nehézségi erőterének rendellenességei

Az európai referenciarendszer pontjai





CHAMP mesterséges hold

miatt a mesterséges holdak tényleges pályája kismértékben eltér az ellipszistól. A holdak tényleges pályájának pontjai földi megfigyelőállomásokról – vagy esetleg más mesterséges holdakról – mérhetők. A tényleges pályaelemek alapján ki lehet számítani a nehézségi erőter rendellenességeit.

A mesterséges holdak pályája a Föld felszínén létesített néhány száz vagy még több megfigyelőállomás több éven át gyűjtött 10–100 ezer mérési eredményéből határozható meg. Az egyes mesterséges holdak és földi megfigyelőállomások távolságát a mesterséges holdak megjelenésétől az 1970-es évekig fényképek segítségével, optikai eljárással mérték. Azóta viszont a mikrohullámokon alapuló távolságmérési eljárások váltak uralkodóvá.

A mesterséges holdak felhasználása a Földalak meghatározására egyidős a mesterséges holdakkal. Már 1958-ban a Szputnyik-II pályájának elemzése alapján is meghatározták a forgási ellipszoid alakját. Azóta számos mesterséges holdat bocsátottak fel ilyen célú mérésekhez. Példaként említem az amerikai Vanguard, a GEOS1–3, a Lageos mesterséges holdakat.

A nehézségi erő rendellenességeinek meghatározásához jól felhasználhatók a navigációs célra létrehozott rendszerek mesterséges holdjai is. Ilyen rendszer a globális helymeghatározó rendszer (GPS), melyről már hallhattak a Mindentudás Egyetemén.

A GPS mesterséges holdak pályáját a Föld egészen nagyjából egyenletesen elosztott, mintegy 110 pontból – az úgynevezett International Terrestrial Reference System (ITRS) pontjaiból – mérik. Ezenkívül mintegy 500, GPS segítségével rendszeresen meghatározott pont alkotja az International Terrestrial Reference Frame (ITRF) rendszert. Az egyes mesterséges holdak észlelésén alapuló eljárást „Satellite-only” eljárásoknak nevezik. Ezeknél az eljárásoknál egy földi pont és valamely mesterséges hold távolsága szolgál a számítások alapjául.

Az utóbbi időben alakult ki az előbbinél pontosabb „Satellite-to-Satellite Tracking” (SST) eljárás. Ennél az eljárásnál két mesterséges hold helyzetét GPS eljárással, távolságának változását mikrohullámú távméréssel mérik.

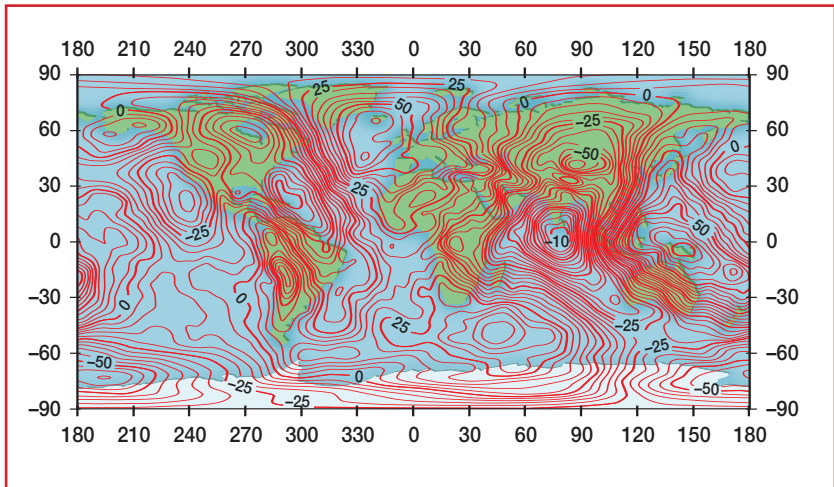
GPS:

az objektumok geometriai adatainak nyérésére szolgáló, mesterséges holdakon alapuló amerikai navigációs és helymeghatározási rendszer.

Az adatokból nagy pontossággal kiszámíthatók a nehézségi erőter rendellenességei és azok időbeli változása. SST eljárás megvalósítására hozták létre a 2000-ben felbocsátott német CHAMP (Challenging Mini-Satellite Payload for Geophysical Research and Application) rendszert.

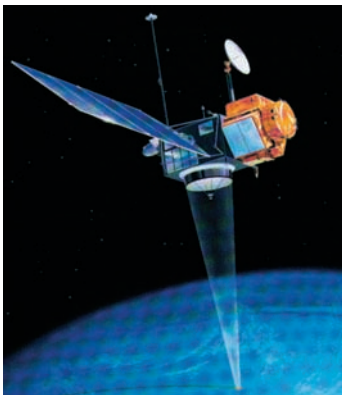
A mesterséges holdakon elhelyezett radar magasságmérők (altiméterek) közvetlenül mérik a mesterséges hold és a tengerfelszín távolságát. Ennek alapján meghatározható valamely vonatkozási ellipszoidhoz képest a tengerfelszín topográfiája (azaz közvetlenül a geoid).

Tengerfelszín topográfiája



Az altiméter mérések pontossága – az árapályhatás és a hullámmás figyelembevétel után – deciméter körüli érték. A legfontosabb európai és amerikai altiméter-programok a következők:

- › ERS-1 (1991), ERS-2 (1995), ENVISAT (2002);
- › Geosat (1985), TOPEX/Poseidon (1992), GFO (1998), Jason-1 (2001).



TOPEX műhold radar altiméterrel

A különböző mesterséges holdakon alapuló mérések kombinált feldolgozásával egyre pontosabb képet nyertünk a geoidról. Már 1963-ban állítottak elő a Föld egészére vonatkozó geoidképet. Ebben a geoidundulációk szintvonalainak távolsága tíz méter volt. Ennek megfelelően csak meglehetősen elnagyoltan tükrözte a Föld elméleti alakját. Napjainkban ennél lényegesen pontosabb geoidok is előállíthatók.

Ha valamely kisebb területen – például egyetlen országban – akarjuk meghatározni a geoidot, akkor földi geodéziai mérések (gravimetria, földrajzi helymeghatározás, szintezés) eredményeinek felhasználása is szükséges. Ebben az esetben elérhető a centiméter vagy a centiméter alatti pontosság is. Az ilyen lokális geoidok nemcsak tudományos szempontból, hanem a gyakorlati helymeghatározás (például a GPS alkalmazása) szempontjából is nagyon fontosak.

A geoid és a Föld nehézségi erőterének pontos ismerete nemcsak a tudósok számára érdekes. A nehézségi erőter változását mutató térképeket katonai célra is felhasználják: bizonyos rakétafajták irányítása ezek segítségével történik. A polgári felhasználási területek közül legfontosabb az ásványkutatás.

A fizikai Földalak klasszikus meghatározása és ábrázolása

A Föld fizikai alakját, azaz a szárazföldek és a vizek felszínét hagyományosan földi mérések, majd a repülőgép feltalálása óta légi fényképeken végzett mérések alapján határozták meg. A meghatározás természetesen kiterjedt az emberek által létrehozott tárgyakra is.

Az analóg korszakban a nyert adatok tárolására és megjelenítésére egyaránt a **térkép** szolgált.

A térkép a Föld felszínét arányosan kicsinyítve, valamely vonatkozási felületre vetítve ábrázolja. A kicsinyítés mértékét a térképek méretarányával szokták megadni. A méretarány jó közelítésben valamely földfelszíni hosszából és a megfelelő térképi hosszából számítható. Általában tört alakban adják meg, például az 1:5000 azt jelenti, hogy valamely földfelszíni távolság térképi megfelelője az eredeti távolság 1/5000 része, vagy fordítva, a térképen 1 centiméternek a valóságban 5000 centiméter (50 méter) felel meg. Minél kisebb a nevezőben szereplő szám, annál nagyobb felbontású a térkép.

A térképeket hagyományosan – már az ókori Rómában is – két célra használták fel:

- › a tulajdon nyilvántartására és megadóztatására szolgáltak az úgynevezett kataszteri térképek;
- › a hadviselés segítésére készültek a magassági adatokat is tartalmazó úgynevezett topográfiai térképek.

A most említett térképek előállításakor a felszín egyes pontjait, vonalait, felületeit mérték. Mai szóhasználatul élve *vektor jellegű* adatokat – pontokból, vonalakból, síkidomokból összetevődő adatokat – állítottak elő. A **vektoradatok** a vizsgált területnek csak kiválasztott elemeit tartalmazzák.

Térkép:

a Föld egyes részeit arányosan kicsinyítve, megadott vetítési szabályok szerint általában sík felületen ábrázoló fénykép vagy rajz.

Vektoradat:

az objektumok térbeli helyzetét pontok, vonalak, felületek segítségével megadó geometriai adat.



Kataszteri térkép



Topográfiai térkép

Ortofotó-térkép:

a térképek jellemzőivel ellátott raszterállomány, amely egyesíti a fényképek tartalmát a térképek geometriai követelményeivel.

Raszteradat:

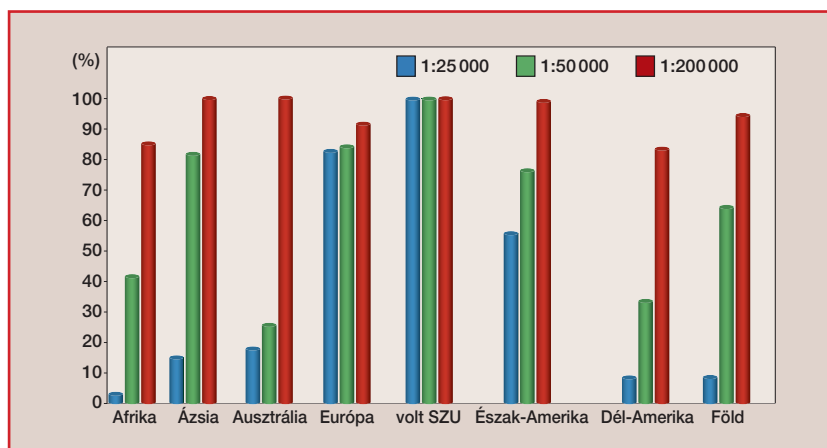
valamely terület egészét összefüggő idomok segítségével leíró geometriai adat.

A fényképezés elterjedése lehetővé tette a felszín képi ábrázolását. Erre a célra szolgálnak az úgynevezett **ortofotók**, amelyek egyesítik a térképek geometriai pontosságát a képi látvány sokszínűségével.

A képi jellegű – a vizsgált terület egészét összefüggően ábrázoló – adatokat gyakran **raszteradatoknak** nevezik. A raszteradatokból előállíthatók vektoradatok is.

A hagyományos eszközök felhasználásával a Föld egész felszínének térképezése szinte reménytelen feladatnak tűnt. Ezt tükrözte, hogy az 1990-es évek elején a Föld jelentős területeiről még közepes méretarányú térképpel sem rendelkezünk, s a változás igen lassú volt.

A Föld feltérképezettsége
1990-ben



A fizikai Földalak meghatározása űrtechnikai eszközökkel

Helymeghatározó (navigációs) rendszerek felhasználása

A Föld fizikai felszínéről adatokat nyerhetünk oly módon, hogy az eredetileg általában katonai célra készített helymeghatározó – navigációs – rendszerek segítségével meghatározzuk a fizikai Földfelszín jellegzetes pontjainak koordinátáit.

Az űrtechnika felhasználásával a különböző országok – mindenekelőtt a katonai nagyhatalmak – különböző helymeghatározó rendszereket hoztak létre. A ma legismertebb helymeghatározó rendszer az amerikai NAVSTAR/GPS (Navigation System with Time and Range/Global Positioning System) elvét és megvalósítási módját Pap László professzor úr egy korábbi előadásán bemutatta.

A GPS-t megelőzően az amerikai hadsereg az NNSS (Navy Navigation Satellite System) rendszert használta helymeghatározási célra. Az orosz hadsereg megfelelő rendszere a **GLONASS** (Globalnaja Navigacionnaja Szputyiknaja Szipstema). Az Európai Unió országai által tervezett **GALILEO** navigációs rendszer holdjainak tervezett fellövési ideje 2008.

A helymeghatározó rendszerek a vektoradatok előállításának széles körben elterjedt eszközei. Alkalmazásuk lehetővé teszi a térképek és térinformációs rendszerek adatállományának gyors, nagy pontosságú előállítását.

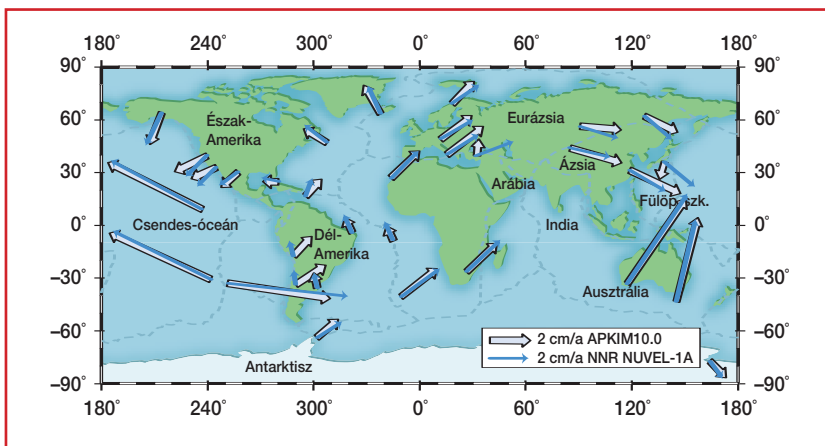
A helymeghatározó rendszerek mesterséges holdjai, illetve az azok megfigyelését szolgáló földi megfigyelőhálózat pontjai alkalmasak a Földfelszín globális mozgásainak meghatározására is. A már említett ITRF rendszer pontjainak különböző időpontokhoz tartozó koordinátái (például ITRF 1993, ITRF 1997, ITRF 2000) alapján – esetleg más eljárásokat is felhasználva – meghatározhatók a különböző kontinentális táblák mozgásai. A következő ábra a kontinensek táblamozgásait mutatja a Német Geodéziai Bizottság által végzett mérések alapján.

GALILEO:

az objektumok geometriai adatainak nyérésére szolgáló, mesterséges holdakon alapuló, az Európai Unió országai által tervezett navigációs és helymeghatározási rendszer.

GLONASS:

az objektumok geometriai adatainak nyérésére szolgáló, mesterséges holdakon alapuló orosz navigációs és helymeghatározási rendszer.



A kontinensek vándorlása



A GPS alkalmas lokális mozgások kimutatására is. Az ilyen célú mérések eredményei segíthetik a földrengés-előrejelzést. Jó példa az ilyen célú mérésekre a kaliforniai Szent András-árok törésvonalainál létrehozott hálózat. Ezzel a hálózattal az árok két partján elhelyezett pontok távolságának változását mérik, ebből következtetnek a feszültség növekedésére, s a földrengés valószínűségére.

Érdekességként említem, hogy a Műegyetem K. épületének harmadik emeletén elhelyezett állandóan működő GPS-vevővel követni lehetett az épület évenkénti néhány milliméteres süllyedését.

A mozgásokhoz kapcsolódik a GPS eredeti, navigációs célú felhasználása is. Ez ma már a magyarországi teherautók, sőt személygépkocsik esetében is viszonylag gyorsan terjed. Olvashatunk már a GPS mezőgazdasági célú felhasználásáról is. A GPS népszerűvé válását mutatja, hogy ma már a „civil” felhasználók is hozzájuthatnak a mobiltelefonnal egybeépített készülékekhez.

A témát egy néhány évvel ezelőtti rablási történettel zárom. Pár éve Magyarországon elraboltak egy értékes rakománnyal megrakott teherautót. A vezető szemét bekötötték, a teherautót pedig elvitték egy biztosnak tűnő helyre, és ott kirakodták. Ezt követően a kocsit visszavitték a rablás helyére és otthagyták. Három óra múlva a rendőrség megjelent a rakodási helyen és elfogta a közreműködőket. A gyors nyomozás úgy történhetett, hogy a teherautó GPS segítségével meghatározott helyzetét folyamatosan sugározta a szállítmányozási cég párizsi központjába. Ott csupán annak a helynek a koordinátáit kellett meghatározni, ahol hosszabb ideig – a rakodás alatt – állt az autó, s ezt a helyet közölték a magyar rendőrséggel.

A távérzékelés

Az eddig tárgyalt helymeghatározó rendszerek vektor jellegű adatokat (elsősorban koordinátákat) szolgáltatnak. A fizikai Földfelszín megismerése képek – azaz raszteradatok – alapján a **távérzékelés** révén lehetséges. A távérzékelés olyan eljárás, amellyel valamely tárgy jellegéről és tulajdonságairól információhoz jutunk anélkül, hogy közvetlen kapcsolatba kerülnénk a tárggyal. A tárgy és a képalkotó rendszer közötti kapcsolatot az elektromágneses sugárzás valamely fajtája biztosítja.

A távérzékelés tárgyalásakor a következő három kérdésre keressük a választ:

-) Milyen eljárással készülnek a képek?
-) Honnan készülnek a képek?
-) Milyen célból készítik, milyen célra használják a képeket?

A távérzékeléshez használt képek többféle elven működő felvevőrendszerrel készülhetnek. A felvevőrendszereket általában két csoportra osztják: *passzív és aktív rendszerekre*.

A **passzív rendszerek** a leképzett tárgyak – azaz a Földfelszín bizonyos része – által kibocsátott, illetve visszavert természetes sugárzást regisztrálják. A passzív rendszerek általában a látható fényt és az ahhoz közeli egyéb optikai tartományba eső 0,4–15,0 mikrométer hullámhosszúságú sugárzást érzékelik. A passzív rendszerű felvevőrendszerre példa lehet egy hagyományos fényképezőgép.

Távérzékelés:

adat- és információszerzés közvetlen kapcsolat nélküli mérés útján; szűkebb értelemben légi és űreszközökről a látható, infravörös és mikrohullámú tartományban készített képek alapján végzett mérés.

Passzív távérzékelési rendszer:

olyan távérzékelési rendszer, amely a leképzett tárgyak által kibocsátott, illetve visszavert természetes sugárzást érzékeli (például a fényképezőgép).

Az **aktív rendszerek** maguk is rendelkeznek sugárforrással, s az általuk kibocsátott és a leképzett tárgyak által visszavert sugárzást érzékelik. Az aktív rendszerek általában a milliméter–méter hullámhosszúságú mikrohullámú tartományhoz tartozó sugárzást érzékelik. Talán legismertebb képviselőjük a 0,0075–0,60 m tartományba tartozó elektromágneses sugárzást kibocsátó és felfogó radar.

A távérzékelte felvételek készülhetnek *a Föld felszínéről, a levegőből és az űrből*. A mai előadásban azokkal a távérzékelési eljárásokkal foglalkozunk, amelyeknél a felvevőrendszert űreszközön (mesterséges holdon, űrsiklón) helyezik el. Az űreszközből készített képeket a továbbiakban *űrfelvételeknek* nevezzük.

Az űrfelvételeket a gyakorlati felhasználhatóság szempontjából a következő paraméterekkel jellemezhetjük:

- › geometriai felbontás (azaz az egyes képelemeknek – pixeleknek – megfelelő terepi méret);
- › spektrális felbontás (a felhasznált elektromágneses sugárzás hullámhossz-tartományainak száma – az egyes tartományokat csatornának nevezzük);
- › időbeli felbontás (a képek készítésének gyakorisága).

A különböző távérzékelési célra készített képek tárgyalásakor a képek készítésével kapcsolatban általában két adatot közölnek, ezek segítségével lehet azonosítani a képfajtát:

- › a felvevő eszközt hordozó mesterséges hold típusát és esetleg sorszámát (például NOAA–14, LANDSAT 4,5);
- › a felvevőeszköz fajtáját (például AVHRR, TM).

Tehát például a „LANDSAT–TM felvétel” kifejezés azt jelenti, hogy a kép valamelyik LANDSAT mesterséges holdon elhelyezett TM (Thematic Mapper) felvevő készülékkel készült.

A felvételeket készítésük elsődleges célja alapján négy csoportba sorolhatjuk:

- › meteorológiai,
- › erőforrás-kutatási,
- › térképészeti,
- › katonai

célú felvételek. Természetesen az elsődleges cél mellett a felvételek egyéb célra is felhasználhatók.

Aktív távérzékelési rendszer: sugárforrással rendelkező távérzékelési rendszer, amely az általa kibocsátott és a leképzett tárgyak által visszavert sugárzást érzékeli (például a radar).

Elsődleges cél	Hold pályamagassága (km)	Geometriai terepi felbontás (km/m)	Spektrális felbontás (csatornák száma)
Meteorológiai (2D)	36 000 (geostacionárius) 800 (kvázipoláris)	5×5 km 1×1 km	3–5
Természeti erőforrás-kutatás (2D)	300–900 120×120 m	20×20 m	4–8
Térképészet (3D)	200–300	0,8×0,8 m 10×10 m	1–3
Katonai	nincs adat	nincs adat	nincs adat

A táblázat nem tartalmazza a katonai célú felvételek jellemzőit. A táblázatban szereplő 2D (kétdimenziós) és 3D (háromdimenziós) jelölések azt mutatják, hogy az adott típusú űrfelvételekből csak síkrajzi (2D), vagy térbeli (3D) kiértékelés is lehetséges.

A meteorológiai felvételek

Az első meteorológiai célú mesterséges hold az 1960-as években felbocsátott amerikai Tiros volt. A felvételeket a Földdel együtt mozgó (geostacionárius), mintegy 36 000 kilométer magasságú pályán elhelyezkedő mesterséges holdakról vagy a Föld körül mintegy 800 kilométer magasságban keringő kvázipoláris mesterséges holdakról készítik.

A meteorológiai célú mesterséges holdak geometriai felbontása geostacionárius holdakról készített felvételek esetén mintegy 5×5 km, kvázipoláris holdakról készített felvételek esetén mintegy 1×1 km. A spektrális felbontást 3–5 csatornával jellemezhetjük. Az időbeli felbontás igen nagy, geostacionárius holdak esetén 0,5–1 óra, kvázipoláris holdak esetén mintegy 6 óra.

A meteorológiai célú felvételek – a Vissy Károly által egy korábbi előadásban bemutatott időjárás-előrejelzés mellett – nagy területre kiterjedő folyamatok (például erdőtűzek, árvizek) megfigyelésére szolgálnak.



LANDSAT-3

A természeti erőforrás-kutatás

A természeti erőforrások felkutatását célzó felvételeket először az 1970-es évek elején készítették. Az első ilyen hold az 1972-ben felbocsátott Earth Resources Technology Satellite (ERTS-1), a későbbi a LANDSAT 1 volt. Erőforrás-kutatásra igen sok mesterséges holdat és különböző típusú felvevőrendszereket fejlesztettek ki. A felhasznált mesterséges holdak 300–900 kilométer magasságban keringenek a Föld körül. A felvevőrendszerek között mind optikai (passzív), mind radar (aktív) eszközöket egyaránt találunk. Napjainkban egyre több ország bocsát fel ilyen célt szolgáló mesterséges holdat.

Néhány optikai rendszert hordozó szatellit neve és felbocsátási éve:

-) LANDSAT 1–3 (amerikai) 1972–1984
-) SPOT P 1–4 (francia) 1986–1993
-) KATE 2000 (szovjet), 1980
-) JERS 1 OPS (japán) 1992
-) IRS 1 A–D (indiai) 1988–1997

Néhány radarrendszert hordozó szatellit neve és felbocsátási éve:

-) Seasat (amerikai) 1978
-) ERS 1,2 (ESA) 1991, 1995
-) Almaz (orosz) 1991
-) Radarsat (Kanada) 1995



SPOT-5

A radarrendszerek előnye az optikai rendszerekkel szemben, hogy felhős égbolt esetén is alkalmasak felvételek készítésére.

A természeti erőforrás-kutató mesterséges holdakról készített felvételek geometriai felbontása 10×10 m és 120×120 m között mozog. Spektrális



ERS-2 szatellit, 1995

felbontásuk nagy, a különböző felvevőeszközök 4–8 különböző hullámhossz-tartományra érzékenyített csatornán készítenek felvételeket.

Az egyes hullámhossz-tartományok különböző jelenségek megfigyelésére alkalmasak. Például a talaj víztartalmának kimutatására a 0,76–0,90 μm közeli infratartomány szolgál.

A következőkben a LANDSAT (4–5) holdak TM felvevőrendszerének csatornabeosztását mutatjuk be (az egyes hullámhosszak mellett feltüntetjük célszerű felhasználási területüket is):

Csatorna	Hullámhossz (μm)	Példa az alkalmazásra
1	0,45–0,52 (kék)	talaj és növényzet vizsgálata
2	0,52–0,60 (zöld)	folyóvizek vizsgálata
3	0,63–0,69 (vörös)	jég- és hómezők térképezése
4	0,76–0,90 (közeli infra)	a talaj nedvességtartalmának meghatározása
5	1,55–1,75 (közép infra)	a növényzet és a talaj nedvességének kimutatása
6	2,08–2,35 (közép infra)	kőzet- és ásványfajták megkülönböztetése
7	10,40–12,50 (hő infra)	növényi betegségek felismerése

A természeti erőforrás-kutató mesterséges holdak időbeli felbontása a kéthetenkénti felvételteljesítéstől az esetenkénti expedíciókig terjed.

A természeti erőforrás-kutatás, környezetvédelem céljára készített felvételek alkalmazási lehetősége igen széles körű. Ilyen felvételeken észlelték például a csernobili katasztrófát. Békés célra például a mezőgazdaság, a környezetvédelem, a közlekedés, az ásványvagyon-kutatás területén

hasznosíthatók. A mesterséges holdak fontos eszközei a termésbecslésnek, az EU-csatlakozás utáni magyarországi mezőgazdasági támogatás igényléséhez szükséges térképek egy részét is ilyen felvételek alapján állították össze.

Korábban a GPS hasznosításával kapcsolatban említettem egy rablási esetet. Most egy lopási történet következik. Az Egyesült Államokban a mezőgazdasági területek öntözésére szolgáló víz magántulajdonban van. Arizonában a már említett közeli infratartományra „élesített” űrfelvételek alapján kimutatták az öntözött területeket. Ezeket összevetették a vízjoggal rendelkező tulajdonosok földterületét ábrázoló térképpel. Azokon az öntözött területeken, ahol a tulajdonos nem rendelkezett vízjoggal, feltehetően lopták a vizet. Megjegyzem, hogy a kirótt büntetés bőven elegendő volt az űrfelvételekkel kapcsolatos költségek fedezésére.

A térképészeti célú felvételek

A térképészeti célra készített felvételek kisebb területek viszonylag nagy pontosságú térképezését szolgálják. Ezeket a felvételeket – a 3D kiértékelés érdekében – átfedéssel készítik. A szomszédos képek mintegy 60 százalékban ugyanazt a területet ábrázolják. A hordozóeszközök pályamagassága 200–300 kilométer.

A térképészeti célú felvételeket készítő mesterséges holdak sorát 1986-ban a francia SPOT nyitotta meg 10 méteres felbontásával, 1991-ben az orosz KVR 1000 már 2 méter felbontású képet biztosított. Az ezredfordulón amerikai magánvállalatok a korábbinál is nagyobb felbontású képeket állítottak elő. A Space Imaging 1999-ben felbocsátott IKONOS holdjáról készített képek legjobb felbontása 0,82 méter, a Digital Globe Quick Bird képének legjobb felbontása 0,61 méter.

A nagy geometriai felbontás ellenértékeként az erre a célra szolgáló felvívő rendszerek spektrális felbontása kicsi (1–3 csatorna). Az időbeli felbontás az egy hónap és az esetenkénti felvételkészítés között mozog.

A térképészeti célú felvételeket készítő rendszerek közül folyamatosan szolgáltató például a francia SPOT HRV (High Resolution Visible), az indiai IRS-1C/1D. Esetenkénti expedíciókban vesz részt például az orosz KOZ-MOSZ KFA 1000, illetve az amerikai magántársaságok 1999-től működő rendszerei (például az Ikonos).

A térképészeti célú felvételek hasznosítása – igen nagy terepi felbontásuk következtében – széles körű. Meglepő módon az űrfelvételek teszik lehetővé a megapoliszok (például Shanghai, Mexikóváros) lakosságának becslését. A térképészeti és közlekedési célú hasznosítás mellett megemlítem jelentőségüket a katasztrófák okozta károk felderítésekor. Példaként a tragikus 2001. szeptember 11-ét említem, amikor szinte azonnal láthatuk a Pentagon és a World Trade Center megsérült épületét. (A kézirat végső változatának elkészítése idején egy újabb katasztrófa – az indonéziai földrengést követő szökőár – rombolását láthatjuk az interneten közzétett képeken).



Két felvétel a cunami pusztításáról, 2005

A katonai célú felvételek

A katonai célú rendszerek adatait a kereskedelmi forgalomban hozzáférhető szakirodalom általában nem közli. Ma azonban már ismert, hogy az amerikai Corona program keretében már 1960 körül 3 méter felbontású űrfényképeket készítettek.

A képek feldolgozása

A távérzékelési eszközökkel létrehozott képek feldolgozásának első lépése az előállító szervezetek által végzett radiometriai és geometriai feldolgozás. A radiometriai feldolgozással a képalkotást terhelő különböző hatásokat korrigálják. A geometriai feldolgozással a képet valamely vonatkozási és vetületi rendszerbe transzformálják. A képeket a későbbi felhasználók digitális formában, illetve analóg képként rendelhetik meg.

A képek feldolgozása egyrészt a geometriai adatok, másrészt a szakadatok (például geológiai tulajdonságok, hidrológiai jellemzők) kinyeréséből tevődik össze. A geometriai adatok kinyerésének eljárásai vektor- vagy raszterállományokat eredményezhetnek. A képekből a szakadatokat digitális képek esetén valamilyen *digitális képfeldolgozási eljárással*, analóg képek esetén a képek úgynevezett *interpretációval* nyerik.

A szakadatok hatékony kinyerésének előfeltétele a megfelelő geometriai és spektrális tulajdonságokkal rendelkező kép, illetve képek kiválasztása. A képválasztás alapvetően az objektumok jellegétől függ.

Az analóg formában megjelenített képek interpretációját a vizsgált szakterülettel kapcsolatos ismeretekkel rendelkező szakember végzi. (Például az egyes kőzetfajták felismerése a geológus feladata.) Az interpretáció célja a kép tartalmának minél teljesebb meghatározása.

A távérzékelésnek különös jelentősége van az időben változó jelenségek megfigyelése esetén. Ilyenkor a különböző időpontokban készített űrfelvételek összehasonlításából következtetnek a változásokra. Példa lehet a Tisza árvizeinek nyomon követése.



Az adatok rendszerezése, megjelenítése és a fejlődés útjai

A térinformációs rendszerek

A Földfelszín hagyományos ábrázolási eszköze, a térkép egyidejűleg tárolta és megjelenítette az információkat. Az informatika fejlődése lehetővé tette a helyhez kapcsolódó információk gyűjtésére, kezelésére, elemzésére és megjelenítésére szolgáló információs rendszerek kialakítását. Az ilyen rendszereket **térinformációs** vagy **geoinformációs rendszereknek** nevezzük.

A térinformációs rendszerekben elválnak egymástól az adatok tárolásá-

Térinformatika:

a térbeli információk elméletével és feldolgozásuk gyakorlati kérdéseivel foglalkozó tudomány.

nak és megjelenítésének funkciói. Mind a helymeghatározó rendszerekkel, mind a távérzékeléssel nyert adatok feldolgozása ma már ilyen eszközökkel történik.

A térinformációs rendszerek az adatok elemzésének (például mozgás-vizsgálatok) és az adatok megjelenítésének számos lehetőségét biztosítják. A megjelenítés nemcsak statikus formában, hanem multimédiás eszközökkel is lehetséges.

Mit hoz a jövő?

Izovonal (szintvonal):

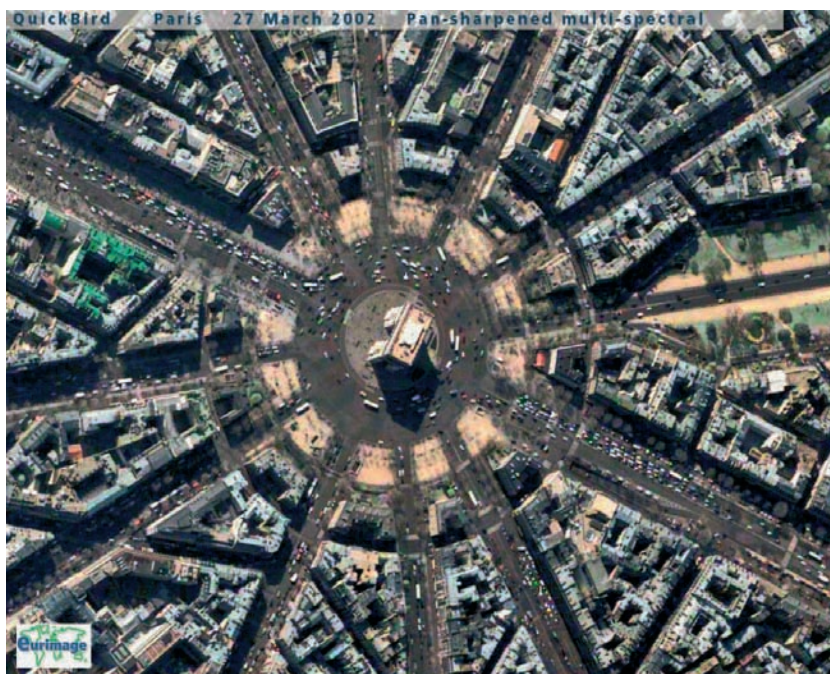
természetes vagy mesterséges tereptárgyak vízszintes vonala, amelynek minden pontja azonos magasságú.

Az Szputnyik–I fellövése óta kevesebb mint fél évszázad telt el. Azóta a Föld alakjával és méretével összefüggő ismereteink megsokszorozódtak. Negyven évvel ezelőtt az első, a Föld egészét magában foglaló geoid **izovonalai**-nak távolsága még tíz méter volt. Ma a deciméter körüli felbontásnál tartunk. A helymeghatározó eszközök lehetővé teszik, hogy a kontinensek mozgását centiméter körüli pontossággal mérjük. Az űrtechnika csodálatos eszközt adott a különböző földtudományok művelőinek – geodétáknak, geofizikusoknak, geológusoknak – a kezébe.

Nem irreális elképzelés, hogy a következő évtizedekben a Föld egészének alakját centiméteres pontossággal határozzuk meg. A Föld olyan égitest, amely változtatja az alakját, és az űrtechnika segítségével az eddigieknél sokkal alaposabban ismerhetjük meg a mozgását.

A távérzékelés kezdetén, a múlt század hatvanas éveiben az első meteorológiai célú mesterséges holdak felbontása még kilométer nagyságrendű érték volt. Az 1970-es évek elején a természeti erőforrások kutatására készült Landsat 1 MSS felvételeket a 79×56 m képelemméret jellemezte. A 2001-ben fellőtt térképészeti célú Quick Bird átlagos képelemmérete $0,72 \times 0,72$ m.

A párizsi Diadalív a Quick Bird felvételén



Ez azt jelenti, hogy három évtized alatt 8500-szorosára növekedett az ugyanakkora területről rendelkezésünkre álló információ mennyisége. Egyre több ország kapcsolódik be a távérzékelési tevékenységbe. Új típusú, új elveken alapuló fellevőeszközöket hoztak létre. A térinformációs rendszerek elterjedése és a rendszerek többségének hozzákapcsolása az internethez a korábbiakban elképzelhetetlen feldolgozási lehetőséget biztosít a felhasználóknak. Ezzel egyidejűleg rendkívüli mértékben megnőtt a felhasználók köre.

A gyors ütemű technikai fejlődés nagy valószínűséggel folytatódik. Ez részben – bizonyos határokig – növeli az egyetlen holdról nyerhető információ mennyiségét. Az eszközök számának növekedése további információmennyiség-növekedést jelenthet. Olyan új űreszközök létrehozása is várható, amelyek ma még megoldhatatlan feladatok megoldására lesznek alkalmasak. (Nem tűnik utópisztikusnak például az az amerikai elképzelés, hogy egy évtized múlva egyetlen mesterséges holdról figyelik majd New York közlekedését.) Az informatika fejlődése pedig új lehetőségeket biztosít az eredmények feldolgozásában. Ha mindezeket túl figyelembe vesszük az internet bővülő lehetőségeit is, akkor joggal mondhatjuk, hogy az emberiség egyre nagyobb hányada gazdagodik a Földdel kapcsolatos egyre alaposabb ismeretekkel.



Budapest Belvárosának részlete, felülről



Ajánlott irodalom

Balaton Ortofotók. Pécs: Székely és Társa K., 2003.
Budapest Ortofotók. Pécs: Székely és Társa K., 2004.
Detrekői Ákos – Szabó György: Bevezetés a térinformatikába. Bp.: Nemzeti Tankönyvkiadó, 1995.
Detrekői Ákos – Szabó György: Térinformatika. Bp.: Nemzeti Tankönyvkiadó, 2002.
Detrekői Ákos: Geometria képekből. In: *Magyar Tudomány*, Vol. 95 (Új folyam 33.) (1988) 10. sz.
Detrekői Ákos: Környezetvizsgálat – geoinformatika. In: *Magyar Tudomány*, Vol. 101 (Új folyam 39.) (1994) 9. sz.
Domokos Györgyné: Távérzékelés a műszaki gyakorlatban. Bp.: Műszaki Kiadó, 1984.

Klinghammer István – Pápay Gyula – Török Zsolt: Kartográfia története. Bp.: Eötvös K., 1995.
Klinghammer István: A föld- és éggömbök története. Bp.: Eötvös K., 1998.
Newton, Isaac: A Principiából és az Optikából. Bukarest – Bp.: Kriterion – Európa, 1981.
Pécs Ortofotók. Pécs: Székely és Társa K., 2001.
Szabó Árpád: A görög matematika kibontakozása. (Gyorsuló Idő sorozat). Bp.: Magvető, 1978.
Zentai László: Számítógépes térképészet. Bp.: Eötvös K., 2000.

Felhasznált irodalom

Bernhardsen, Tor: Geographic Information System. New York – London: John Wiley & Sons, Inc., 1999.
Bill, Ralf: Grundlagen der Geo-Informationssysteme. Heidelberg: Herbert Wichmann Verlag, 1999.
Biró Péter: A csillagászati geodézia helye a XXI. században. In: *Geodézia és Kartográfia*, 2004/2.: 3–10.
Biró Péter: Felsőgeodézia. Bp.: Tankönyvkiadó, 1985.
Detrekői Ákos: Reference Systems. In: Bähr, Hans-Peter, Vögtle, Thomas (Hrsg.): GIS for Environmental Monitoring, E. Stuttgart: Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, 1999. 10–17.
Detrekői Ákos: Geodézia és űrtechnika. In: *Geodézia és Kartográfia*, 1991/3.: 164–171.

Homoródi Lajos: Felsőgeodézia. Bp.: Tankönyvkiadó, 1966.
Husti, György: Globális helymeghatározó rendszer: bevezetés. Sopron: Nyugat-Magyarországi Egyetem, 2000.
Konecny, Gottfried: Geoinformation, Remote Sensing, Photogrammetry and Geographic Information Systems. London – New York: Taylor&Francis, 2003.
Resnik, Boris – Bill, Ralf: Vermessungskunde für den Planungs-, Bau- und Umweltbereich. Heidelberg: Herbert Wichmann Verlag, 2000.
Torge, Wolfgang: Geodäsie. Berlin: Walter de Gruyter, 2003.